滴灌水肥一体化下施氮量对夏玉米氮素吸收利用及土壤硝态氮含量的影响

郭丽，史建硕，王丽英，李若楠，任燕利，张彦才

(1. 河北省农林科学院农业资源环境研究所　石家庄　050051; 2. 河北省肥料工程技术研究中心　石家庄　050051)

摘　要:河北山前平原夏玉米高产区施肥不合理现象普遍存在，农业面源污染严重。研究华北山前平原水肥一体化条件下夏玉米适宜的氮肥运筹，可为该区氮素优化施用技术及提高氮肥利用效率提供依据。本研究以‘郑单 958’玉米品种为材料，于 2014—2015 年 2 个玉米生长季，在滴灌条件下设置 4 个施氮水平(N0：不施氮；N1：120 kg hm^{-2}；N2：240 kg hm^{-2}；N3：360 kg hm^{-2})，研究滴灌水肥一体化下施氮量对玉米氮素吸收利用和土壤硝态氮含量的影响。结果表明：N0 处理的玉米干物重及产量较其它处理显著降低，N1~N3 处理间无显著差异；N1 处理的玉米氮含量和氮累积量较 N0 处理显著增加，施氮量在 N1~N3 范围内，不同年份间玉米植株氮含量和氮累积量存在一定差异，总体表现为随施氮量的增加而上升的趋势，但随施氮量的增加，植株氮含量和氮累积量上升幅度逐渐降低；N2 处理的氮肥收获指数最高；随施氮量增加，氮肥当季回收利用率、氮肥农学效率、氮肥生产效率和氮肥利用效率显著降低；2014 年同一施氮量在 0～100cm 土壤范围内硝态氮含量逐渐降低，2015 年施氮量 240 kg hm^{-2} 和 360 kg hm^{-2} 的土壤硝态氮在 100cm 土层深度达到累积峰，经过 2 年种植后，施氮量超过 240 kg hm^{-2}，土壤硝态氮淋洗加剧，被淋洗至 100 cm 土层。利用一元二次方程拟合产量与施氮量之间的关系，明确了玉米最高产量的施氮量为 199~209 kg hm^{-2}，经济施氮量为 174~187 kg hm^{-2}。综合考虑经济效益和生态效益，该条件下夏玉米滴灌施氮量以经济施氮量为宜。

关键词:滴灌水肥一体化；夏玉米；施氮量；氮素吸收利用；土壤硝态氮

中图分类号: S143.3　　文献标识码: A1

Effects of Nitrogen Amount on Nitrogen Absorption and Use of Summer Maize and Soil NO_3-N Content under Drip Fertigation*

GUO Li , SHI Jianshuo, WANG Liying**, LI Ruonan, REN Yanli, ZHANG Yancai

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Hebei Academy of Agriculture and Forestry Science, Shijiazhuang 050051, China; 2. Hebei Fertilizer Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050051, China)

Abstract: Inappropriate management of fertilization is common in the area of high-yield summer maize in the piedmont plain of Taihang Mountain in Hebei Province. Overuse of fertilizers results in serious waste of fertilizer and agricultural non-point source pollution. This study focus on the appropriate nitrogen application for high yields of summer maize under the condition of water-fertilizer integration, which will be beneficial to optimizing the technology of nitrogen application and improving the efficiency of fertilizer utilization in the piedmont plain of Taihang Mountain in Hebei Province. Taking Zhengdan 958 as test material, four nitrogen amounts treatments (N0: none; N1:120 kg hm^{-2}; N2:240 kg hm^{-2}; N3:360 kg hm^{-2}) were set under drip fertigation condition in 2014 and 2015 summer maize seasons. The effects of different nitrogen application rates on the uptake and utilization of nitrogen in maize and content of nitrate nitrogen in soils were studied. Results showed that the dry matter weight and the yield of maize in N0-treatment were significantly decreased than those in others treatments, while no significant differences were shown among N1, N2 and N3 treatments. The nitrogen content and nitrogen accumulation in maize under N1 treatment were significantly increased compared with that of N0 treatment. In the range of N1 ~ N3, the nitrogen content and nitrogen accumulation, differed among different years, was ascending with the increase of nitrogen application amount. However, nitrogen accumulation rate decreased gradually with the further increase of nitrogen application amount. The nitrogen harvest index was the highest in N2 treatment. Nitrogen recovery efficiency, nitrogen agronomy efficiency, nitrogen productive efficiency and nitrogen use efficiency were decreased significantlywith the amount of nitrogen application increasing. In 2014, the content of nitrate nitrogen decreased gradually in 0-100 cm soil layer under same nitrogen amount condition. In 2015, the content of nitrate nitrogen reached to the cumulative peak value in 100 cm soil layer under the usage of 240 kg hm^{-2} and 360 kg hm^{-2}, respectively. This may be related to that nitrate nitrogen leaching in soil was aggravated and rinsed to 100 cm soil layer when nitrogen amount exceeded 240 kg hm^{-2} during

two years of maize cultivation. According to the relation between N application rate and yield fitted by one variable quadratic equation , The highest maize yield needed nitrogen application amount ranged from 199 kg hm^{-2} to 209 kg hm^{-2}and the economic nitrogen application amount ranged from 174 kg hm^{-2} to 187 kg hm^{-2}. Considering the ecological environment and the economic benefit, the economic nitrogen application amount was optimal for summer corn under drip irrigation condition.

Keywords: Drip fertigation; Summer maize; Nitrogen application rate; Nitrogen uptake; Soil NO_3-N content

玉米是华北地区乃至全国重要的粮食作物，保障玉米高产稳产对国民经济发展具有举足轻重的作用。但该区干旱少雨，水资源严重缺乏，农业用水占地下水总开采量的 78.82%，合理开发利用水资源成为华北地区一项重要的战略选择[1]。滴灌施肥是借助施肥装置和灌溉系统将肥料随着灌水一起输送到植物根部土壤，滴灌施肥(水肥一体化)能精确控制灌水和施肥量，可根据土壤状况及作物生育阶段特性精准控制灌水和施肥的数量及比例，充分发挥水肥耦合效应，提高水肥利用效率，减少养分损失。这项技术的应用为作物提供适宜的水肥条件，改善了土壤微环境，使作物产量大幅度提高。研究表明，与传统灌溉相比，滴灌节水40%，较喷灌节水 30%[2-3]，灌施肥的 N 利用效率可达到 75%~80%，传统施肥只有 40%[4]。滴灌施肥在以色列、美国、澳大利亚等农业发达国家已大面积应用[5-7]，而我国大田作物滴灌施肥技术仅在西北干旱地区部分应用，在新疆滴灌施肥玉米产量超高产水平，且氮素偏生产力和氮肥利用率分别提高到 122 kg(N) hm^{-2} 和 45%[8]。华北地区玉米种植中应用滴灌施肥一体化技术较少，研究玉米滴灌水肥一体化适宜的施氮量不仅减少环境污染，还可节约宝贵的水资源，有效的缓解该区深层地下水超采。

氮素是影响玉米产量和品质最关键的营养元素，对玉米的生长发育极为重要，适量适时的氮素供应量不仅起到提质增效的作用，还能避免或较少氮素淋失，对保护生态环境具有意义。迄今，诸多学者围绕玉米基因类型[9]、氮素类型[10]、氮素量[11]、施氮时期和次数、栽培方式[12-14]等方面探讨了玉米氮素的累积、分配及利用效率规律及氮素淋溶问题。如在东北吉林从玉米产量、氮肥利用率和土壤硝态氮累积情况考虑，合理施氮量应控制在 180~240 kg·hm^{-2} [15]，华北平原黑龙港流域中部施氮量为 180 kg·hm^{-2} 时可满足各器官对氮素的需求，实现高产高效[16]，新疆乌兰地区采用滴灌施肥研究表明玉米产量在 17 109~17 138 kg·hm^{-2}，最佳经济施氮量为 427.9~467.7 kg hm^{-2}[8]。但目前有关华北地区施氮量对玉米氮素利用及环境效应方面的影响多集中在采用地面畦灌，基、追氮肥各一次的条件下进行研究，西北地区玉米种植虽然部分采用滴灌水肥一体化，但光、温、汽、热与华北地区存在较大差异。因此，华北山前平原滴灌水肥一体化下玉米氮素吸收、利用及土壤硝态氮含量对施氮量的反应亟待明确。本研究通过 2 年田间试验，研究了滴灌条件下不同氮肥用量对玉米干物质积累、产量、氮素吸收利用效率和土壤硝态氮含量的影响，旨在建立河北山前平原滴灌水肥一体化玉米优化施肥技术，为该区玉米高产协同水分资源、氮素养分高效利用提供技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 试验区概况

本试验于 2014 年和 2015 年在农业部鹿泉农业环境野外观测实验站进行(38°12′N, 114°38′E)。植制度为冬小麦-夏玉米复种轮作, 2014 年和 2015 年玉米季降雨量分别为 246 mm 和 329 mm。该地区为华北平原山前平原，土壤为黏壤质洪冲积石灰性褐土。该试验基础土壤 0~20 cm 的土壤硝态氮 11.28 mg kg^{-1}、速效磷 14.6 mg kg^{-1}、速效钾 85.0 mg kg^{-1}, 2014、2015 的供试玉米品种为‘郑单 958’。

1.2 试验设计

试验设计 4 个施氮处理，施氮量分别为 0 kg hm^{-2}、120 kg hm^{-2}、240 kg hm^{-2} 和 360 kg hm^{-2}，记作 N0、N1、N2 和 N3。随机区组排列，重复 3 次，小区面积 64 m^2。各处理的磷、钾肥用量一致，分别为 P_2O_5 105 kg hm^{-2} 和 K_2O 270 kg hm^{-2}。供试肥料氮、钾肥的 40%和磷肥的 80%底施，其余氮、磷、钾肥按照施肥量，配成固体水溶性肥料，分别在拔节期、吐丝期及灌浆期 3 个时期滴灌施肥，每个追肥时期的追肥量分别占总追肥量的三分之一。底肥供试氮肥为尿素，磷肥为磷酸二铵，N0 处理为过磷酸钙，钾肥为氯化钾。追肥滴灌水溶性肥料的氮肥为尿素，磷肥为磷酸一铵，钾肥为氯化钾。夏玉米全生育期灌溉 4 次，灌溉量根据作物生育阶段和土壤墒情确定，播种期灌溉量为 450 m^3 hm^{-2}，追肥灌溉量为 150~180 m^3 hm^{-2}。

1.3 测试项目与方法

1.3.1 植株干物重

每个小区分别在夏玉米拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期取长势均匀一致的 5 株植株，于 105 ℃杀青 30 min, 75 ℃烘至恒重，计算单位面积干物质量。

1.3.2 植株含氮量

将用于测定不同时期干物重的 5 株植株分不同部位后,于 105 ℃杀青 30 min，在 75 ℃烘干至恒重粉碎。

采用浓硫酸消煮，凯氏定氮仪测定植株各器官的全氮含量，再用加权法计算植株含氮量，有关氮素吸收利用的计算公式[7,8,10,13]如下:

氮素累积量=含氮量(%)×干物质质量　　(1)

氮素收获指数(%)=籽粒氮素吸收量/植株地上部氮素积累量　　(2)

氮肥当季回收率(%)=(收获期施氮区地上部总吸氮量-收获期不施氮地上部总吸氮量)/施氮量×100%　　(3)

氮肥农学效率(kg kg^{-1})=(施氮区籽粒产量-不施氮区籽粒产量)/施氮量　　(4)

氮肥生产效率(kg kg^{-1})=籽粒产量/施氮量　　(5)

氮素利用效率=(kg kg^{-1})籽粒产量/植株地上部氮素积累量　　(6)

经济施氮量(kg hm^{-2})= $-(b-Px/Py)/2a$　　(7)

式中：a 为产量和施氮量拟合一元二次方程的一次项系数, b 为二次项系数, Px 为氮肥价格 4.96 元·kg^{-1}, Py 为玉米价格, 2.0 元·kg^{-1}[17]。

1.3.3 土壤硝态氮含量测定

夏玉米成熟期，采用土钻法取 0～100 cm 土层土样，每 20 cm 为一层，取后立即装入自封袋中并置于-20 ℃冰冻保存。测定时将土壤样品解冻、混匀、过 2 mm 筛。称取 12 g 土壤样品，采用 1 mol·L^{-1} 的 KCl 溶液 50 mL 浸提 1 h，浸提液用紫外分光光度计比色测定。同时测定土壤含水量，计算干土硝态氮含量。

1.3.4 产量

成熟期每小区取 2 个 2 m^2 的小麦植株，采用小型脱粒机进行脱粒，风干，测定籽粒含水量后折算成含水量为 13%的产量。

1.4 数据处理

数据处理分析采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 19.0 数据分析软件进行数据统计分析和差异显著性检验。

2.结果与分析

2.1 滴灌水肥一体化下施氮量对玉米干物质积累的影响

玉米干物质积累量对施氮量的响应见图 1。2014 年玉米拔节期 N0 干物质累积量较 N1 和 N2 处理显著降低，与 N3 处理的干物质累积量无显著差异，灌浆期 N0 处理干物质积量量显著低于 N1、N2 和 N3 处理，但 N1、N2 和 N3 处理间无显著差异，成熟期不同施氮处理间干物质积累与拔节期表现出相似趋势。2015 年不同施氮处理对玉米干物质累积量的影响表现为拔节期 N2 和 N3 处理显著高于 N0 处理，灌浆期和收获期表现为 N1、N2 和 N3 处理显著高于 N0 处理，但 N1、N2 和 N3 处理的干物质累积量无显著差异。上述结果表明在滴灌水肥一体化条件下，施氮量在 0~120 kg hm^{-2} 范围内随施氮量增加玉米干物重呈上升趋势，但施氮量在 120 ~360 kg hm^{-2} 范围内玉米干物质积累对施氮量反应无显著差异。

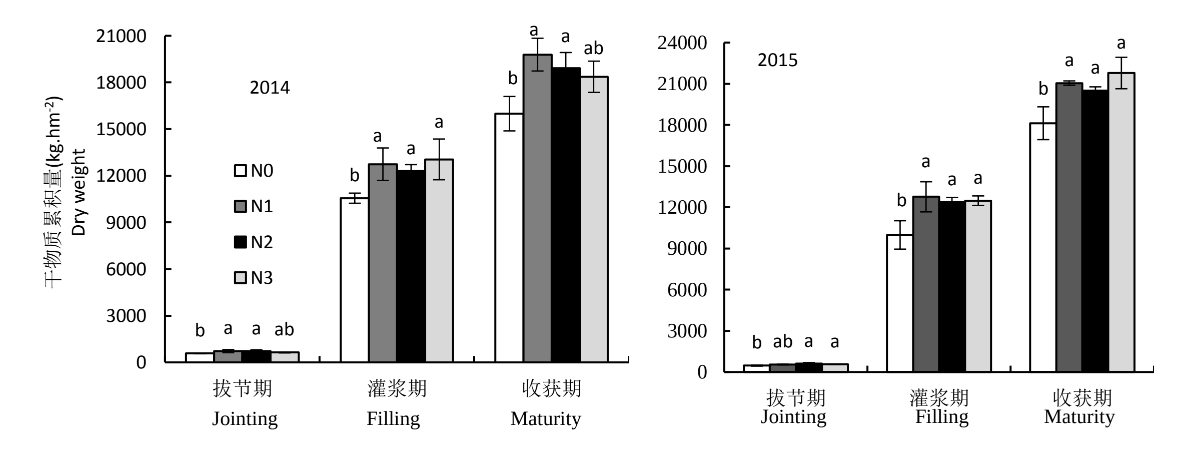


图 1　2014 年和 2015 年不同施氮量对夏玉米干物质累积量的影响。

Fig. 1　Effects of nitrogen application rate on summer maize dry weight in 2014 and 2015

注:不同字母分别表示不同处理差异达 5%显著水平。下同。N0:不施氮; N1:120 kg hm^{-2}; N2:240 kg hm^{-2}; N3:360 kg hm^{-2}。Note: Different letters mean significantly difference among the nitrogen treatments at 5% levels. The same is in other figures.　N0: no nitrogen, N1: 120 kg hm^{-2} nitrogen, N2: 240 kg hm^{-2} nitrogen, N3: 360 kg hm^{-2} nitrogen.

2.2 滴灌施氮量对玉米植株含氮量和氮累积量的影响

滴灌水肥一体化下玉米植株不同时期氮含量及氮累积量对施氮量的反应见表 1, 2014 年不同生育时期植株氮含量均表现为 N0 处理显著低于 N1、N2 和 N3 处理, N1、N2 和 N3 处理间表现为拔节期植株氮含量无显著差异，吐丝期、灌浆期和成熟期植株氮含量表现为 N3 处理显著高于 N1 处理，但与 N2 处理差异不显著。2015 年不同生育时期施氮处理植株氮含量均显著高于 N0 处理, N1、N2 和 N3 处理植株氮含量比较表现为拔节期、灌浆期和成熟期无显著差异，吐丝期表现为 N1< N2< N3 处理，且呈显著性差异。尽管不同年份间玉米植株氮含量存在一定差异，但总体表现为随施氮量的增加而上升的趋势。

2014 年不同时期玉米植株氮累积量表现为 N0 显著低于施氮处理，施氮处理间相比较(表 1)，拔节期 N1、N2 和 N3 无显著差异，吐丝期、灌浆期和成熟期表现为 N3 处理显著高于 N1 处理, N2 和 N3 的氮累积量无显著差异；2015 年不同时期 N0 处理玉米植株氮累积量显著低于施氮处理，N1、N2 和 N3 比较表现为拔节期和灌浆期无显著差异，吐丝期 N1 处理显著低于 N3 处理，成熟期 N3 处理植株氮累积量最高，与 N1 和 N2 处理显著性差异。综上所述, 2014 年和 2015 年玉米不同时期氮累积量总体表现为随施氮量的增加而增加，但施氮量高于 120 kg·hm^{-2} 时，随施氮量的增加植株氮累积效应逐渐降低。

表 1　施氮量对夏玉米植株氮含量及氮累积量的影响

Table 1　Effects of nitrogen application rate on N content and N accumulation amount in wheat

年份 Year	处理 Treatment	氮含量 N content(g.kg^{-1})				氮累积量 N accumulation amount (kg·hm^{-2})			
		拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	灌浆期 Filling	成熟期 Maturity
2014	N0	29.7±1.9c	19.1±0.3c	14.3±0.6c	10.5±1.1c	17.10±0.68b	85.12±4.66c	150.78±3.35c	166.92±6.08c
	N1	36.2±1.3a	23.3±1.7b	18.3±0.5b	12.7±1.3b	26.27±3.53a	123.49±7.69b	233.52±24.03b	250.89±21.57b
	N2	39.4±4.1a	26.2±2.4ab	20.8±0.7ab	14.6±0.5ab	27.95±0.85a	138.53±5.87ab	255.29±8.59a	275.97±8.04a
	N3	39.3±2.9a	29.7±3.0a	21.5±0.7a	1.51±0.8a	25.07±2.96a	158.63±14.91a	259.74±10.42a	276.05±8.33a
2015	N0	25.4±0.7b	14.5±0.6d	12.3±1.6b	9.8±0.9b	12.73±1.60b	71.76±3.03c	123.24±9.14b	176.79±8.96c
	N1	32.5±1.3a	20.2±1.7c	17.2±1.7a	11.4±0.2a	17.86±1.37a	98.52±10.60b	221.41±18.45a	240.43±14.09b
	N2	33.3±1.8a	23.9±1.8b	18.3±0.6a	12.0±1.1a	19.17±2.17a	113.77±4.95a	226.37±16.42a	245.51±21.78b
	N3	34.5±0.6a	27.4±1.7a	18.0±0.5a	12.6±0.6a	19.69±0.82a	118.92±5.50a	227.39±20.18a	274.08±25.33a

注:同列中同一年份不同字母分别表示不同处理差异达 5%显著水平,下同。Note: Different small letters in a column mean significantly difference among the nitrogen treatments in a year at 5% levels. The same is in other tables.

2.3 滴灌施氮量对玉米籽粒产量和氮素利用效率的影响

2014 年的玉米产量表现为 N0 处理显著低于 N1 和 N2 处理(表 2)，氮收获指数 N0 和 N1 处理显著高于 N2 和 N3 处理, N2 和 N3 处理无显著差异，氮肥当季回收率和氮肥农学效率表现为 N2 和 N3 处理显著低于 N1 处理, N2 和 N3 处理差异不显著，氮肥生产效率以 N1 处理最高，显著高于 N2 和 N3 处理，氮利用效率表现为随施氮量增加而降低的趋势，N3 处理显著低于 N0 和 N1 处理，但与 N2 处理显著不差异。2015 年玉米籽粒产量表现为 N1 处理最高，显著高于 N0，但与 N2 和 N3 处理无显著差异；氮收获指数以 N0 和 N1 处理显著高于 N2 和 N3 处理，氮肥当季回收率、氮肥农学效率、氮肥生产效率与 2014 年趋势一致，氮肥利用效率表现为随施氮量的增加而降低。上述结果表明，连续 2 年在 120~360 kg·hm^{-2} 的施氮范围内的玉米产量和氮收获指数表现施氮量增加呈先增加后降低的抛物线趋势，随施氮量的增加，氮肥当季回收率、氮肥农学效率、氮肥生产效率及氮利用效率表现为逐渐降低趋势。

表 2　施氮量对夏玉米籽粒产量和氮素利用效率的影响

Table 2　Effects of nitrogen fertilizer application rate on grain yield and nitrogen use efficiency in summer maize

年份 Year	处理 Treatment	产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	氮收获指数 N harvest index(%)	氮肥当季回收率 N recovery efficiency (%)	氮肥农学效率 N agronomy efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥生产效率 N productive efficiency (kg·kg^{-1})	氮肥利用效率 N use efficiency (kg·kg^{-1})
	N0	7831.55b	0.58a				46.96a

2014	N1	9969.76a	0.6a	0.61a	24.49a	83.08a	39.87b
	N2	9562.74a	0.52b	0.45b	7.21b	39.84b	34.62bc
	N3	8702.62ab	0.48b	0.3b	3.35b	25.1c	31.55c
	N0	10857.63b	0.65a				61.81a
2015	N1	12854.77a	0.70a	0.53a	20.64a	107.12a	53.48ab
	N2	12080.44ab	0.61b	0.29b	5.28b	50.34b	49.33bc
	N3	11748.25ab	0.55c	0.26b	2.47b	32.63c	43.17c

2.4 滴灌施氮量对土壤硝态氮含量的影响

收获期 0～100cm 土层土壤硝态氮含量对施氮量的响应见图 3, 2014 年玉米收获季, 0～20cm 土层, N2 和 N3 处理硝态氮含量显著高于 N0 和 N1 处理, N2 和 N3 处理无显著差异, 40cm 以下各土层不同处理间土壤硝态氮含量均表现为随施氮量的增加而上升趋势; 同一施氮水平下不同土层硝态氮含量的变化表现为随土壤层次加深而逐渐降低。2015 年, 同一土层深度下施氮处理间土壤硝态氮含量变化与 2014 年有相同趋势, 施氮量越高, 土壤硝态氮含量越高; 相同施氮量不同土壤层次硝态氮含量变化表明, N0 处理随土壤层次加深土壤硝态氮含量逐渐降低, N1 和 N2 处理在 0～60 cm 土层逐渐减少, 60～100 cm 土层土壤硝态氮含量呈增加趋势, N3 处理随土壤层次加深土壤硝态氮含量增加, 且 60～100 cm 土层土壤硝态氮含量显著增加。综上所述, 2014 年同一施氮量在 0～100cm 土壤范围内硝态氮含量逐渐降低, 2015 年施氮量 240 kg hm^{-2} 和 360 kg hm^{-2} 的土壤硝态氮在 100cm 土层深度达到累积峰。可见, 经过 2 年种植后, 施氮量在 240 kg hm^{-2} 和 360 kg hm^{-2} 时, 土壤硝态氮被淋洗至 100 cm 土层。

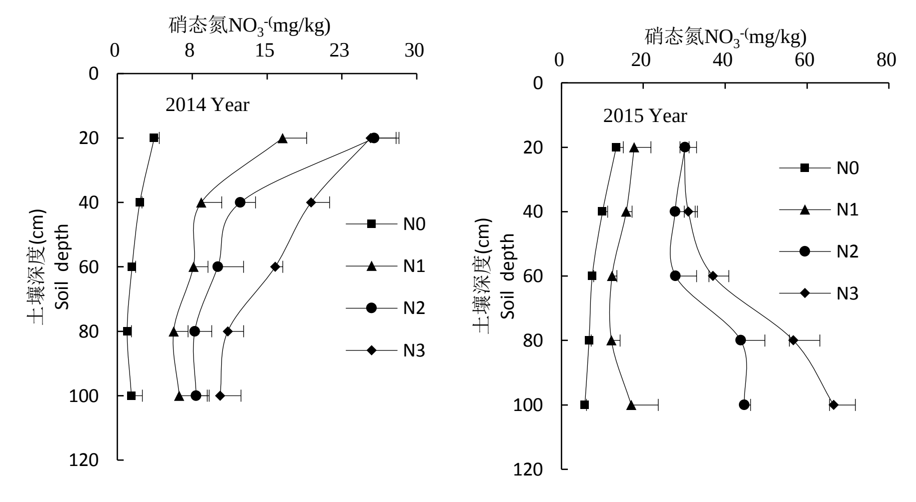


图 3 施氮量对 0～100cm 剖面土壤硝态氮含量的影响

Figure 3 Effects of nitrogen fertilizer application rate on soil NO_3^--N content in 0 to 100 cm depth soil。

2.5 滴灌夏玉米经济施氮量

合理施用氮肥是玉米提高产量的关键, 采用一元二次方程研究籽粒产量和施氮量的关系, 并计算获得最高产量的施氮量和经济施氮量(图 3)。2014 年的拟合方程决定系数为 0.886, 相关系数为 0.94, 2015 年拟合方程的决定系数为 0.748, 相关系数 0.86。可见, 一元二次方程较好地反应了玉米产量与滴灌施氮量之间的关系。经拟合方程得出: 2014 和 2015 年玉米最高产量的施氮量分别为 208.7、199.8 kg hm^{-2}, 经济施氮量分别为 186.4、174.2 kg hm^{-2}。综上所述, 在该试验土壤肥力条件下, 山前平原滴灌玉米的最高产量施氮量为 199~209 kg hm^{-2}; 从经济效益及生态环境角度考虑, 经济施氮量为 174~187 kg hm^{-2}。

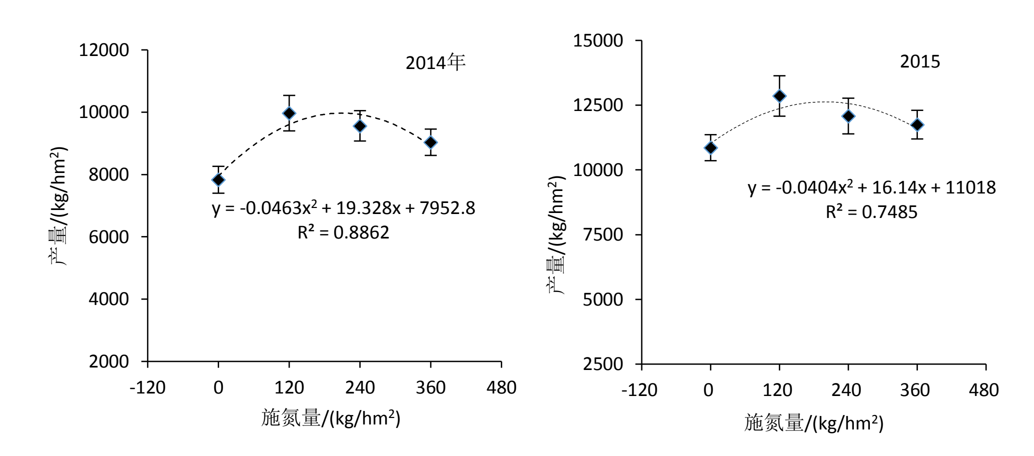


图 3 滴灌夏玉米产量与施氮量的关系

Figure 3 Relations between yield and nitrogen application rate in summer maize under drip fertigation

2.6 各指标相关性分析

滴灌条件下，玉米产量、施氮量及氮素利用效率各指标的相关分析见表 3，施氮量与氮肥当季回收率、氮肥农学效率及氮肥生产效率呈极显著负相关，与氮肥利用效率呈显著负相关，与吸氮量呈极显著正相关；产量与施氮量及氮肥利用相关参数无显著相关；氮收获指数与氮肥生产效率、氮肥利用效率呈极显著正相关，与氮肥农学效率呈显著相关；氮肥当季回收率与氮肥农学效率呈极显著正相关，与氮肥生产效率呈显著正相关；氮肥农学效率与氮肥生产利用效率呈极显著正相关，与吸氮量呈负相关；氮肥生产效率与氮肥利用效率呈显著正相关，与吸氮量呈极显著负相关；氮肥利用效率与吸氮量呈显著负相关。可见，施氮量与植株吸氮量具有显著正相关，而对氮当季回收率、农学效率、生产效率、利用效率呈负相关，与产量无显著相关。

表 3 各个指标间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis between each index

相关系数 CC	施氮量 AON	产量 GY	氮收获指数 NHI	氮当季回收率 NRE	氮肥农学效率 NAE	氮肥生产效率 NPE	氮肥利用效率 NUE	吸氮量 TNU
施氮量 AON	1							
产量 GY	0.14	1						
氮收获指数 NHI	-0.65	0.63	1					
氮肥当季回收率 NRE	-0.90**	-0.03	0.49	1				
氮肥农学效率 NAE	-0.92**	0.18	0.68*	0.94**	1			
氮肥生产效率 NPE	-0.92**	0.53	0.91**	0.80*	0.91**	1		
氮肥利用效率 NUE	-0.67*	0.51	0.86**	0.12	0.34	0.67*	1	
吸氮量 T N U	0.89**	0.23	-0.5	-0.47	-0.67*	-0.84**	-0.71*	1

注: CC-相关系数, AON-施氮量, GY-产量, NHI-氮收获指数, NRE-氮肥当季回收率, NAE-氮肥农学效率, NPE-氮肥生产效率, NUE-氮肥利用效率, TNU-吸氮量。*表示在相关系数在 P=0.05 水平显著(双尾检验), ** 表示在 P=0.01 水平显著(双尾检验)。Note: CC- Correlation coefficient, AON-Amount of nitrogen, GY-Grain yield, NHI-N harvest index, NRE-N recovery efficiency, NAE -N agronomy efficiency, NPE-N productive efficiency, NUE-N use efficiency, TNU-Total N uptake. *Correlation is significant at the 0.05 probability level (2-tailed). ** Correlation is significant at the 0.01 probability level(2-tailed).

3 讨论

滴灌水肥一体化与传统灌溉相比，实现了浇地向浇作物的转变、土壤施肥向植株施肥的转变、水肥分开向水肥同步的转变、单一管理方式向综合管理方式转变、传统农业种植向现代农业种植转变，因此，发展水体一体化是作物高产优质、水肥利用高效、生态环境安全的现代农业重大技术[4]。华北地区水资源匮乏，传统大水漫灌已不能满足生产需要，有必要在夏玉米上采用滴灌水肥一体化的灌溉施肥方式，使该区有限的水资源创造更多价值。

迄今，国内外生产实践所证实，增施氮磷钾养分可提高夏玉米光合产物，尤其是氮素，对提高作物光合产物至关重要[18-19]。有关施氮量对玉米干物质积累和氮累积量的研究已有诸多报道[15,20]。研究表明，江苏地区施氮量在0-540 kg hm^{-2}范围内玉米干物质积累呈单峰曲线变化，以施氮450 kg hm^{-2}时光合干物质累积量最高[21];东北吉林春玉米表现为施氮量超过 240 kg hm^{-2} 后各玉米干物质累积和吸氮量差异不显著，但与

不施氮相比，施氮极显著的促进了玉米地上部氮素的吸收[15]，上述结果均是在畦灌和传统施肥条件下进行研究的。本研究结果表明，华北山前平原滴灌条件下施氮量 0~120 kg hm^{-2} 范围内夏玉米干物质量呈直线上升趋势，施氮量高于 120 kg hm^{-2} 时干物质积累无显著差异；在施氮量 0~360 kg hm^{-2} 范围玉米植株氮累积量逐渐增加，特别是施氮量在 0~120 kg hm^{-2} 范围内对玉米植株氮积累量的影响较大，在施氮量高于 120 kg hm^{-2}~360 kg hm^{-2} 时，随施氮量的增加对玉米植株氮累积量的调控效应逐渐降低，且不同年际间表现为相似趋势，这一结果与前人研究结果存在一定差异，可能是由于施肥、灌溉方式及地域差异等原因引起的。

张经廷研究表明华北低平原区 180 kg hm^{-2} 的施氮量可实现高产与高效并举[16]。在河北曲周，徐明杰采用 ^{15}N 同位素示踪技术探讨肥料氮、土壤氮、作物氮之间的关系，发现优化施肥方式中夏玉米施氮量为 N kg hm^{-2} 时，玉米达到高产水平且氮肥的利用率高[22]。本研究表明，籽粒产量和氮收获指数呈单峰曲线变化，氮肥当季回收率、氮肥农学效率、氮肥生产效率和氮肥利用效率表现为随施氮量增加而降低趋势。通过分析氮肥利用参数的相关关系，表明施氮量与吸氮量呈正相关，而施氮量和吸氮量与氮农学效率、氮生产效率、氮利用效率呈负相关，由此可见，随着施氮量和植株氮吸收总量的增加，植株对氮素的需求逐渐降低，而过量氮肥超出了植株对氮素运转及利用能力，导致植株对氮素的奢侈吸收，从而降低了氮利用效率。

采用一元二次方程研究了两年的施氮量与玉米籽粒产量的关系，根据边际收益等于边际成本的原则，确定 2014 年和 2015 年的经济施氮量分别为 174 kg hm^{-2} 和 187 kg hm^{-2}。根据产量和氮收获指数试验结果，结合方程拟合得出的经济施氮量，从经济效益和生态环境两方面综合考虑，该区玉米适宜氮肥用量为 174~187 kg hm^{-2}。虽然这一结果与张经廷、徐明杰研究不同施氮量的试验结果基本一致[16,22]，但本试验基础地力低于张经廷和徐明杰试验研究的基础地力，且本试验籽粒产量也高于前人研究的结果，因此，滴灌水肥一体化试验条件下氮肥利用效率相对提高。

氮肥过量施入导致硝态氮在土壤中大量累积，增加了硝态氮淋溶风险。前人研究表明，玉米种植中各层土壤硝态氮含量基本随施氮量的增加而升高[25]。华北平原旱作条件下，土壤氮矿化和硝化能力比较强，未被作物利用的大量盈余氮素主要以 NO_3^--N 的形式累积于土壤中，在集中降雨和灌溉情况下淋洗出作物根区，成为氮素损失的一个主要途径[24-25]。徐明杰等采用 ^{15}N 标记的方法研究发现施氮 250 kg hm^{-2} 的土壤硝态氮含量显著高于施氮 180 kg hm^{-2}，且土壤深层硝态氮含量明显增加，有向下淋洗的趋势[22]。本研究表明，在滴灌水肥一体化下，2014 年同一土壤层次硝态氮含量表现为随施氮量的增加而上升，均表现为 0~20 土层硝态氮含量最高，不同施氮处理均表现为随着土壤层次加深硝态氮含量逐渐减少；2015 年不同施氮量处理间同一土壤层次硝态氮含量与 2014 年表现为相同趋势，但不同土壤层次硝态氮含量因施氮量不同而异，在施氮量 0~120 kg hm^{-2} 范围内土壤不同层次间变化较小，但施氮量在 240-360 kg hm^{-2} 范围内 60~100 土层硝态氮含量变化较大，表现为随土层深度增加而上升。综上所述，滴灌水肥一体化下夏玉米种植中第一年过量施氮在生长季降雨量为 249 mm 条件下未导致硝态氮淋溶，但第二年过量施氮在生长季降雨量为 329 mm 条件下土壤硝态氮向下淋溶明显。因此，适宜的施氮量在降雨的影响下减少了硝态氮的淋溶，亦达到节肥、增效和保护生态环境的目标。

由于不同种植年限间夏玉米各生育阶段的降雨量、光照和温度存在差异，对氮肥利用效率及硝态氮的淋溶存在一定影响，因此，该区不同年际间施氮量对玉米 100 cm 土层以下的硝态氮运移的影响需进一步研究。

4 结论

经两年试验研究表明，在本试验土壤肥力下，水肥一体化下，不同时期氮累积量总体表现为随施氮量的增加而增加，但施氮量高于 120 kg hm^{-2} 时，随施氮量的增加植株氮累积效应逐渐降低。夏玉米收获后土壤 $NO3^-$-N 积累量随施氮量增加而上升，施氮大于 240 kg N hm^{-2} 出现土层深度 1m 处有积累。结合玉米籽粒产量、氮肥利用效率和土壤硝态氮含量综合考虑，在华北山前平原采用滴灌水肥一体化条件下玉米的经济施氮量为 174~187 kg hm^{-2}。

参考文献 Referenes

[1]钱永，张兆吉，费宇红，等. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. 中国生态农业学报， 2014， 22(8): 890-897.

Qian Y, Zhang Z J, Fei Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J] .Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(8): 890-897.

[2]高玉山,孙云云，刘方明，等.玉米膜下滴灌水肥一体化技术研究进展[J]. 玉米科学, 2016, 24(6): 155-159.

Gao Y S, Sun Y Y, Liu F M, et al. Research progress of maize fertigation with drip irrigation under mulching film[J]. Journal of Maize Sciences, 2016, 24(6): 155-159.
[3]Oppong D E, Abenney M S, Sabi E B. et al. Effect of different fertilization and irrigation methods on nitrogen uptake, intercepted radiation and yield of okra (*Abelmoschus esculentum* L.) grown in the Keta Sand Spit of Southeast Ghana[J]. Agricultural Water Management , 2015 , 147 (2) :34-42
[4]杨晓宏，严程明，张江周,等。中国滴灌施肥技术优缺点分析与发展对策[J].农学学报 2014,4(1): 76-80.
Yang Xiaohong1, Yan Chengming2,3, Zhang Jiangzhou , et al. The Analysis of Advantages and Disadvantages of Fertigation Technology and Development Strategies in China[J]. Journal of Agriculture, 2014,4(1): 76-80.
[5]Tanaskovik V, Cukaliev O, Romic D, et al. The influence of drip fertigation on water use efficiency in tomato crop production[J]. Agriculturae Conspectus scientificus, 2011, 76(1):57-63.
[6]Agostini F, Tei F, Silgram M, et al. Decreasing nitrate leaching in vegetable crops with better N management [C]//Lichtfouse E.Engineering, Biofertilisation , Soil Quality and Organic Farming. Springer Press, 2010:147-200.
[7]Thompson R B, Martinez-Gaitan C, Gallardo M, et al Identification of irrigation and N management practices that contribute to nitrate leaching loss from an intensive vegetable production system by use of a comprehensive survey[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(3): 261-274.
[8]郭丙玉，高 慧，唐 诚，等水肥互作对滴灌玉米氮素吸收、水氮利用效率及产量的影响[J]. 应用生态学报，2015，26(12): 3679-3686.
Guo B Y, Gao H, Tang C, et al. Response of water coupling with N supply on maize nitrogen uptake, water and N use efficiency, and yield in drip irrigation condition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(12) : 3679-3686.
[9]王玲敏，叶优良， 陈范骏，等.施氮对不同品种玉米产量、氮效率的影响，中国生态农业学报 2012, 20(5): 529–535
Wang L M, Ye Y L, Chen F J, et al. Effect of nitrogen fertilization on maize yield and nitrogenefficiency of different maize varieties[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(5): 529–535.
[10]王 寅，冯国忠，张天山，等.控释氮肥与尿素混施对连作春玉米产量、氮素吸收和氮素平衡的影响[J].中国农业科学 2016,49(3): 518-528
Wang Y, Feng G Z, Zhang T S, et al. Effects of mixed application of controlled-release N fertilizer and common urea on grain yield, N uptake and soil N balance in continuous spring maize Production[J].Scientia Agricultura Sinica, 2016,49(3): 518-528.
[11]张经廷，王志敏，周顺利，夏玉米不同施氮水平土壤硝态氮累积及对后茬冬小麦的影响[J].中国农业科学 2013,46(6):1182-1190
Zhang J T, Wang Z M, Zhou S L. Soil Nitrate N Accumulation Under Different N-Fertilizer Rates in Summer Maize and Its Residual Effects on Subsequent Winter Wheat[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(6):1182-1190
[12]苌建峰，董朋飞，张海红,等.行距配置方式对夏玉米氮素吸收利用及产量的影响[J].中国生态农业学报,2016，24(7): 853–863.
Chang J F, Dong P F, Zhang H H, et al. Effect of row spacing on nitrogen uptake, nitrogen utilization and yield of summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(7): 853-863.
[13]Peng Y F, Yu P, Zhang Y, et al. Temporal and spatial dynamics in root length density of field-grown maize and NPK in the soil profile[J]. Field Crops Research, 2012, 131: 9-16
[14] Jiang W S, Wang K J, Wu Q P, et al. Effects of narrow plant spacing on root distribution and physiological nitrogen use efficiency in summer maize[J]. The Crop Journal, 2013, 1(1): 77-83
[15]叶东靖，高 强，何文天，等. 施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报，2010，16(3): 552-558.
Ye D J, Gao Q, He W T, et al. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize ,Plant Nutrition and Fertilizer Science.
[16]张经廷 刘云鹏 李旭辉，等. 夏玉米各器官氮素积累与分配动态及其对氮肥的响应[J].作物学报 2013, 39(3): 506-514.
Zhang J T, Liu Y P , Li X H, Dynamic responses of nitrogen accumulation and remobilization in summer maize organs to nitrogen fertilizer[J].Acta Agronomica Sinica 2013, 39(3): 506-514.
[17]戢 林, 张锡洲, 李廷轩. 基于“3414”试验的川中丘陵区水稻测土配方施肥指标体系构建[J].中国农业科学, 2011,44(1): 84-92.
Ji L, Zhang X Z, Li T X. Establishing Fertilization Recommendation Index of Paddy Soil Based on the “3414” Field Experiments in the Middleof Sichuan Hilly Regions[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011,44(1): 84-92.

[18]Wang Y L, Liu T X, Tan J F, Zhang X, Li C H. Effect of N fertilization on yield, N absorption and utilization of two species of super high-yielding summer maize[J]. Agricultural Science Technology, 2012,13: 339-342.

[19]Schmidt J, Beegle D, Zhu Q, et al. Improving in-season nitrogen recommendations for maize using an active sensor[J]. Field Crops Res, 2011, 120: 94-101.

[20] Chen Y, Xiao C, Wu D, et al. Effects of nitrogen application rate on grain yield and grain nitrogen concentration in two maize hybrids with contrasting nitrogen remobilization efficiency[J]. European Journal of Agronomy, 2015, 62(62): 79-89.

[21]景立权，赵福成，刘萍，等. 施氮对超高产夏玉米干物质及光合特性的影响[J].核农学报， 2014,28(2) : 0317-0326.

JIing LQ, Zhao F C, Liu P, et al. Effects of Nitrogen Treatments on Dry Matter Production and Photosynthetic Characteristics of Summer Maize(Zea mays L)under Super-high Yield Conditions[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2014, 28(2): 0317-0326.

[22]徐明杰，张琳，汪新颖，等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1) : 36-45.

Xu M J， Zhang L， Wang X Y, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015, 21(1) : 36-45.

[23]靳立斌，崔海岩，李波，等. 综合农艺管理对夏玉米氮效率和土壤硝态氮的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(11): 2009-2015.

Jin L B , Cui H Y, Li B, et al. Effects of Integrated Agronomic Practices on Nitrogen Efficiency and Soil Nitrate Nitrogen of Summer Maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(11): 2009-2015.

[24]赵荣芳，陈新平，张福锁. 华北地区冬小麦-夏玉米轮作体系的氮素循环与平衡[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 684-687.

Zhao R F, Chen X P, Zhang F S. Nitrogen cycling and balance in winter wheat-summer maize rotation system in Northern China Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46(4): 684-687. (in Chinese)

[25]巨晓棠，刘学军，张福锁．冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]．中国农业科学，2002，35(11): 1361-1368.

Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Study on effect of nitrogen fertilizer and nitrogen balance in winter wheat and summer maize rotation system[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2002, 35(11): 1361-1368.